

# 浮遊式洋上風力発電施設の基礎形式に関する研究

## STUDIES ON THE OFFSHORE FLOATING WIND POWER FACILITIES

中澤直樹<sup>1</sup>・牛山 泉<sup>2</sup>・関 和希<sup>3</sup>・金綱正夫<sup>4</sup>

Naoki NAKAZAWA, Izumi USHIYAMA, Kazuichi SEKI and Masao KANETSUNA

<sup>1</sup>正会員 工博 システム工学研究所株式会社 (〒145-0071 東京都大田区田園調布 2-35-13)

<sup>2</sup>正会員 工博 足利工業大学 総合研究センター (〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東海大学 総合科学技術研究所 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

<sup>4</sup>社団法人 日本海洋開発産業協会 (〒105-0001 港区虎ノ門 1-24-10 三興第一ビル)

The Japan Ocean Industries Association (JOIA) has been conducted the feasibility studies on the floating offshore wind power facilities. This paper summarizes the present state of the foundation types of the offshore wind power facilities in Europe as well as the studies of the JOIA, especially the concept of the structure types and the mooring systems of the floating structures. Also the studies on the optimal structure type in the water depth between 20 m and 200 m are presented.

*Key Words : Wind power, floating structures, offshore facilities, foundation type.*

### 1. はじめに

本研究は、日本周辺の海域特性に適合する洋上風力エネルギーを自然エネルギー源の核として位置付け、我が国独自の次世代型大規模洋上風力発電基地（基地全体の総発電容量：約30万kW以上）の実現、並びに海洋自然エネルギーの総合利用技術の実用化などを図ることにより、我が国のエネルギー供給に寄与することを目的としている。本研究は、社団法人日本機械工業連合会の委託事業の一つとして、「浮遊式洋上風力発電委員会」を社団法人日本海洋開発産業協会(JOIA)に設立して実施されたものである<sup>1),2)</sup>。

浮遊式洋上風力発電の場合には、静的および動的運動応答が海底固定式に比べて大きいために、風力発電システムと浮体構造システム間の相互干渉、並びに発電効率などに及ぼす動揺の影響などに関する詳細な検討が必要とされる。しかし、本研究の主目的は浮遊式洋上風力発電基地の実現性に関する概念検討であることから、これらの詳細な研究については将来の課題とし、概念設計並びにコスト算定に必要な水深、海象・気象条件、並びに浮体の静的・動的許容傾斜角度

などを想定して洋上風力発電基地の基礎構造について研究を行った<sup>3),4),5)</sup>。構造形式としては、海洋石油生産用プラットフォームにおける浮体式構造物を参考として①半潜水式 (Semi-submersible)、②TLP型 (テンション・レグ・プラットフォーム)、③バージ型、④SPAR (モノタワー)型、⑤スペース・フレーム型について検討を行った。

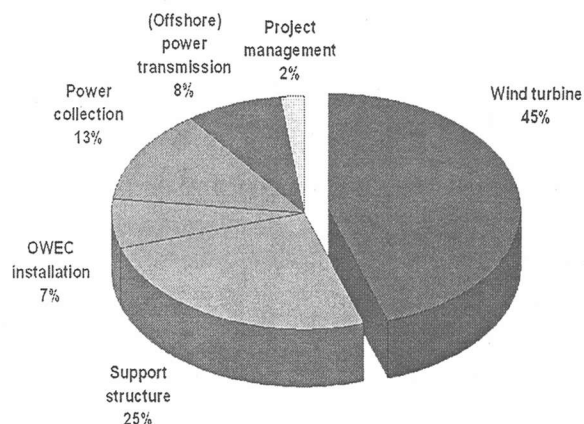
本論文では、上記研究の中から主に洋上風力発電施設の経済性に関する既往研究を紹介すると共に、浮体式とした場合の係留方式とその構造の概念を報告する。更に、施工方法について最近の欧州における技術開発の動向を報告する。

### 2. 洋上風力発電施設のコスト比較例

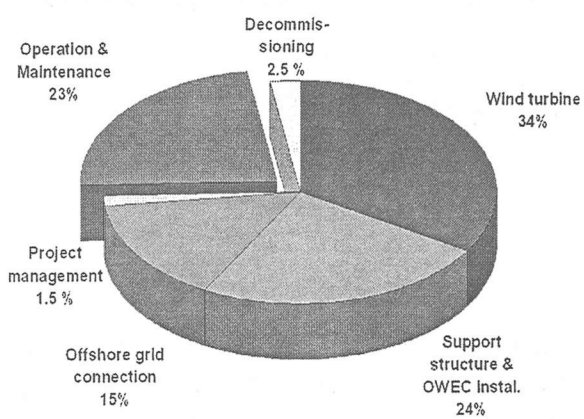
欧州における既設の洋上風力発電施設は着底式基礎が採用されている。この場合、全体コストに占める support structure のコスト比率は、初期投資において25%、発電コストにおいて24%とされており、支持構造形式の決定は経済的側面からも重要課題である。

欧州における洋上風力発電施設の研究である

Opti-OWECS (Structural and Economic Optimization of Bottom-Mounted Offshore Wind Energy Converters) Final Report<sup>6)</sup> による洋上風力発電施設の項目別コスト比率を図-1に示す。



(a) Opti-OWECS のデザインソリューションによる初期投資コスト



(b) Opti-OWECS のデザインソリューションによる発電コスト (年平均風速 8.4 m/sec, 20年ローン, 金利 5%)

図-1 Opti-OWECS Final Report における洋上風力発電の初期投資比率と発電コスト比率<sup>6)</sup>

### 3. 洋上風力発電施設の基礎形式と経済性

#### (1) 既設洋上風力発電施設の基礎形式

既設のものはいずれも水深が 10m 以下で基礎形式は着底式である。Opti-OWECS による机上検討のものは水深 17m に及ぶものもあるが、いずれも着底式が想定されている。着底式の中でも、水深が 5m 前後までの浅瀬に設置される場合は重力式、20m までの場合はモノパイルが採用されている。欧州における主な既設洋上風力発電施設の諸元を表-1に示す。

#### (2) 着底式基礎の経済性検討例

基礎形式は、設置場所の水深や潮流などの海象条件、海底地盤地質条件、経済性、要求能力条件などを考慮して決定される。既存の洋上風力施設の基礎形式は主に以下の 4 形式である。

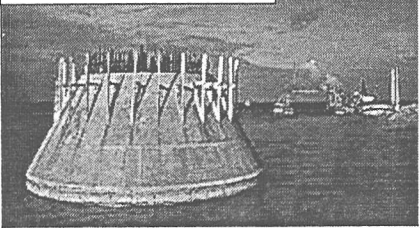
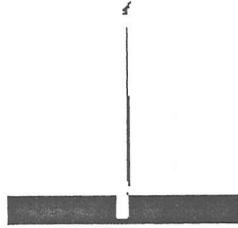
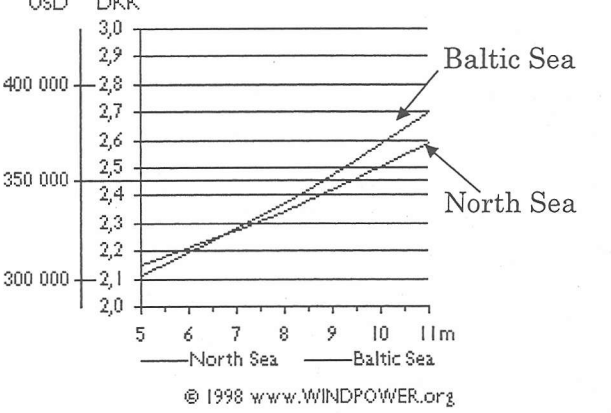
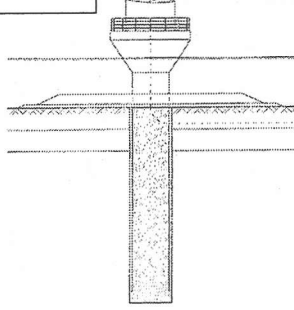
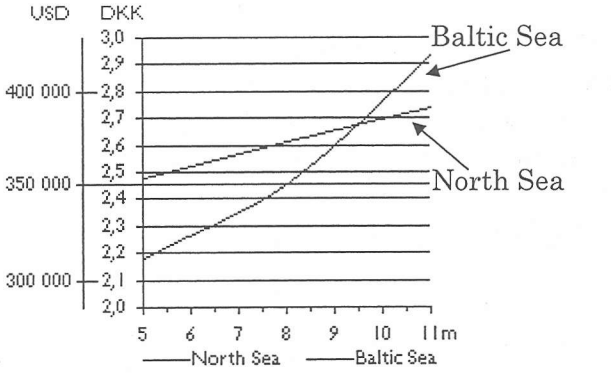
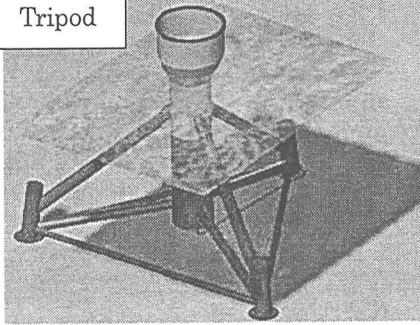
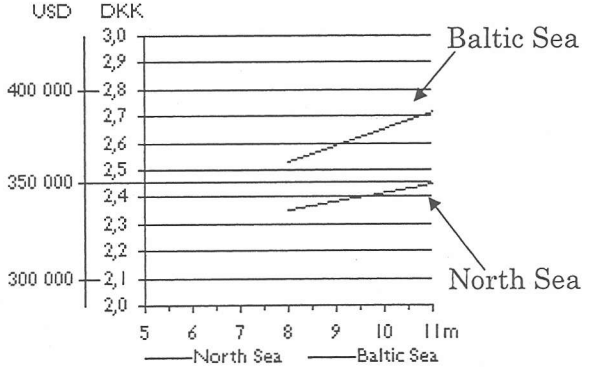
- ・ コンクリート重力式(Traditional concrete)
- ・ スチール重力式(Gravity + steel)
- ・ モノパイル(Mono pile)
- ・ 三脚式(Tripod)

これら 4 形式について、欧州におけるこれまでの設置例から水深と経済性についての検討が行われている。この検討によると、水深 15m 以下についてはスチール製基礎がコンクリート製基礎に比較して経済性に優れているとの結論を出している。また、スチールの錆による劣化については、石油生産プラットフォームの実績から期間 50 年においては問題とはならないとしている。表-2 に Danish Wind Industry Association による欧州における基礎形式別の経済性に関する検討結果を示す<sup>7)</sup>。

表-1 欧州における主な既設洋上風力発電施設の諸元

プロジェクト	Vindeby	Lely	Tuno Knob	Utgrunden	Middlegrunden
設置時期	1991	1994	1995	2000	2000
国	デンマーク	オランダ	デンマーク	スウェーデン	デンマーク
容量	450kWx11 基	500kWx4 基	500kWx10 基	1.4MWx7 基	2MWx20 基
沖合距離	1.5km	1km	6km	12.5km	3km
水深	3-5m	5-10m	3-5m	7-10m	2-6m
基礎形式	コンクリート重力式	コンクリート重力式	コンクリート重力式	モノパイル	コンクリート重力式

表-2 基礎形式別の経済性に関する検討結果<sup>7)</sup>

構造形式	経済性
<p>Traditional Concrete</p> 	<p>初期の洋上風力発電施設の基礎形式として Vindeby や Tunoe Knob で用いられた形式である。コンクリートケーソン形式が多く、ドライドッグで製作され、設置海域に曳航される。</p>
<p>Gravitaion + Steel</p>  <p>© 1998 www.WINDPOWER.org</p>	 <p>USD DKK</p> <p>400 000 300 000</p> <p>3,0 2,9 2,8 2,7 2,6 2,5 2,4 2,3 2,2 2,1 2,0</p> <p>5 6 7 8 9 10 11m</p> <p>— North Sea — Baltic Sea</p> <p>© 1998 www.WINDPOWER.org</p>
<p>Mono Pile</p> 	 <p>USD DKK</p> <p>400 000 300 000</p> <p>3,0 2,9 2,8 2,7 2,6 2,5 2,4 2,3 2,2 2,1 2,0</p> <p>5 6 7 8 9 10 11m</p> <p>— North Sea — Baltic Sea</p>
<p>Tripod</p> 	 <p>USD DKK</p> <p>400 000 300 000</p> <p>3,0 2,9 2,8 2,7 2,6 2,5 2,4 2,3 2,2 2,1 2,0</p> <p>5 6 7 8 9 10 11m</p> <p>— North Sea — Baltic Sea</p>

#### 4. 浮遊式洋上風力発電の支持形式

浮遊式洋上風力発電施設は世界的にも未だ設置例はない。しかし、今後、洋上風力施設の需要の増加とそれに伴う設置水深の増加を考えると、浅海域の少な

い我が国においては将来的に着底式から浮遊式へ移行することが考えられる。浮遊式構造物については、海洋石油生産用プラットフォームにおいて多くの設置例があり、それらの構造形式を風力発電施設の支持構造として応用した場合の概念図を以下に示す。

### (1) 半潜水式風力発電施設 (Semi-submersible)

ローワーハルと呼ばれる浮力体の上にコラム (柱体) を立てるもので、外洋における最も一般的な浮体形式のひとつである。主構造 (浮力体) が水面下に位置することから波力を低減でき、また船型構造の浮遊式構造物に比べて波浪による動揺を小さく抑えることが出来る。ただし、水線面積が小さいため、変動荷重が大きい場合には復元性能に十分な注意を払う必要がある。係留システムは、カテナリワイヤを用いた多点係留方式が一般的であるが、浮体が係留ブイの周りで自由に回転できる一点係留方式もある。この方式では、浮体が波の方向になびくことができるため、波浪抵抗が低減される。半潜水式風力発電施設を図-2 に示す。

### (2) TLP 型風力発電施設

半潜水式であるが、海面上のセミサブ構造をテンションを加えたレグ (パイプ、鋼索、チェーンなど) で係留するため、上下運動や前後及び左右の回転運動が抑制され波浪中の動揺を抑えることができる。近年、Mini-TLPと呼ばれる小型で経済的な構造も実現されている。洋上風力発電への適用のためには、発電施設とプラットフォームの設置における経済性の追求が必要となる。TLP 型風力発電施設を図-3 に示す。

### (3) SPAR (モノタワー) 型風力発電施設

大型の柱体を緊張係留またはカテナリー係留する方式である。石油生産プラットフォームの場合は柱体内部が石油貯蔵に用いられている。柱体部分を水面下に没することにより波浪荷重を低減させると言う考え方もある。SPAR 型風力発電施設を図-4 に示す。

### (4) バージ型風力発電施設

海象条件の比較的穏やかな海域に設置する場合には、メガフロートやバージ型構造が適用できる。構造が単純で、点検・維持補修が容易である反面、他の形式に比べて大きな波浪荷重が作用するため、比較的静穏な海域に適用される。バージ型風力発電施設の風車配置例を図-5 に示す。

### (5) スペース・フレーム型風力発電施設<sup>8)</sup>

スペース・フレーム型は、一般的には着底式であるが浮遊式への適用も可能である。構造はスレンダーな部材を用いたフレーム構造であるため波浪荷重を低減できる。スペース・フレーム型風力発電施設を図-6 に示す。

## 5. JOIA による風車システムの概念設計

### (1) JOIA 浮遊式構造物の諸元の設定

基本的な検討対象の一つとしてプロペラ型を選定し、

3 MW, 5 MWのプロペラ型風車の諸元については大型風車の事例と既存の研究例を参考にして設定した。

一方、浮体の静的・動的応答特性に対する適合性を

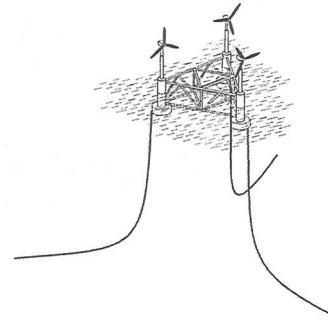


図-2 半潜水型

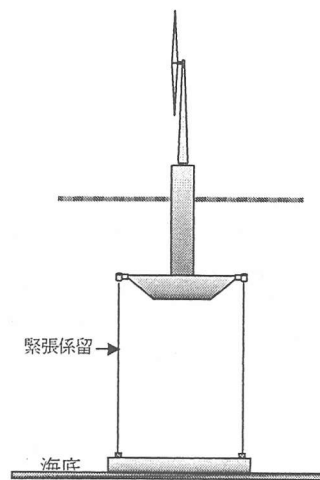


図-3 TLP 型

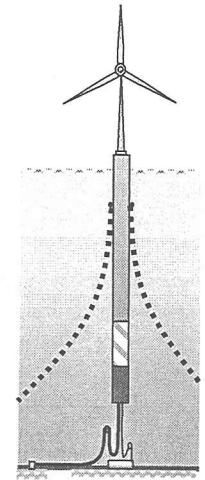


図-4 SPAR 型

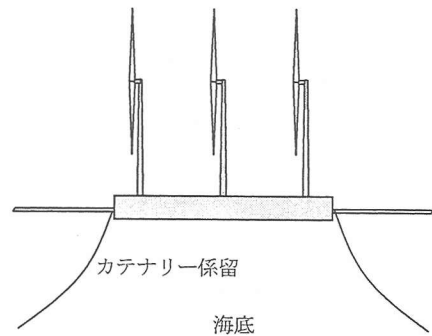


図-5 バージ型

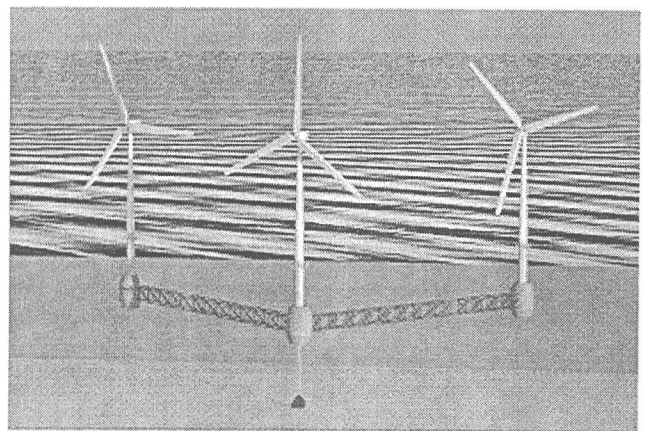


図-6 スペース・フレーム型

表-3 検討対象の浮遊式構造物諸元

様式及び発電容量など						1 浮体の主要目		係留ライン
目標水深	構造様式	風車様式	容量 / 1 棟	棟数	発電容量	全長 x 全幅 x 型深 ~ 吃水 (m) (Spar : 全長 x 直径 ~ 吃水)	排水量 (tf)	
300m	S/S (半潜水型)	ペラ型	3 MW	1	3 MW	79.15 x 90.4 x 36.0 ~ 18.0	6,555	S/S 1 体 : 70mmΦ x 6 本 6 体連結 : 70mmΦ x 2 4 本
			5 MW	1	5 MW	90.41 x 103.0 x 40.0 ~ 20.0	11,892	S/S 1 体 : 81mmΦ x 6 本 6 体連結 : 2 4 本
	Spar 型	ペラ型	5 MW	1	3 MW	110.0 x (7 - 15.2) ~ 100	8,400	Spar 1 体 : (PWS55x2 本)x3 本
100m	複数の風車を搭載するケース、並びに TLP、Articulated Tower などその他の構造様式については今後の課題とする。							
50m	Hybrid 型	垂直軸型	1.7 MW	3	5.1 MW	121.0 x 140.0 x 6.0 ~ 3.2	17,835	Hybrid 一体 : 108mmΦ x 6 本
	Box Girder 型	垂直軸型	1.7 MW	5	8.5 MW	247.0 x 60.0 x 7.0 ~ 2.5	12,020	Box G 一体 : 120mmΦ x 10 本
30m	曳航・着座型	垂直軸型	1.7 MW	3	5.1 MW	123.6x143.0x20.0 ~ 約 18.0	10,000 (着座時)	—
20m	プロペラ型風車を搭載するケース、並びに TLP、Articulated Tower などのその他の構造様式については今後の課題とする。							

注) S/S : Semi-submersible, Hybrid : コンクリートと鋼の複合構造, Box Girder : 箱型断面構造要素の格子構造

考慮した場合、重心が低く、しかも風向の乱れに対して無指向性という特性を持つ直線翼垂直軸型風車も有力な候補の一つとして選定され、検討対象に加えられた。本方式については大型機の商用実績がなく、また風荷重の低減や適切な風車配列などに関する検討課題が残されているが、1棟約 1.7MW の風車を 1 浮体上に複数基搭載する様式を設定した。

風車システムを搭載する浮遊式構造物については、海洋石油生産などにおいて実績のある様々な構造様式があり、設置海域の特性によって適切な様式が選定される。本調査においては表-3 に示すように、水深約 200 m の海域を対象とする構造様式については S/S 型 (半潜水式 Semi-submersible) と Spar 型、水深約 50m の場合には Hybrid 型と Box Girder 型、さらに水深約 20m の浅海域を対象とする場合には曳航・着座型を選定して概念設計が行われた。

## (2) 経済性に関する検討結果

経済性評価については、設置される海域および地域の特性によって評価が異なるが、ここでは、特定の前提条件を設定して概算発電コストを見積もり、当面の目標発電コストを 11.5 円/kWh、最終目標値を 5 ~ 6 円/kWh と仮定して評価を行った。

発電コストに関する検討結果の概要を以下に示す。

- ① 海象条件の厳しい海域を対象とした 5MW プロペラ型風車 1 棟を搭載する S/S 型および Spar 型においては、当面の目標単価を達成するために 30 ~ 40% のコスト削減が必要である。従って、複数の風車搭載、あるいは複数の浮体連結などによるコスト削減が期待される。
- ② Hybrid 型および Box Girder 型においては、相対的に海象条件が穏やかな海域を対象としたこと、並

びに現状の構造物建造単価が S/S 型や Spar 型に比べて低いことなどにより、当面の目標発電コストを達成できるという結果が得られた。一方、最終的な目標単価を達成するためには約 40 ~ 60% のコスト削減が必要とされる。

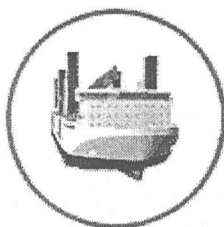
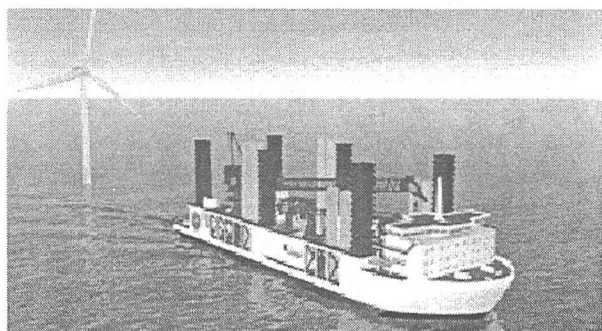
## 6. 曳航・設置、施工技術

初期の洋上風力発電施設の基礎形式として Vindeby や Tunoe Knob で用いられたのはコンクリートケーソンであるが、近年ではモノパイルや重力式鋼製基礎が多くなっている。ヨーロッパの施工法は、手順としては日本で考えられている施工法と差異は認められない。

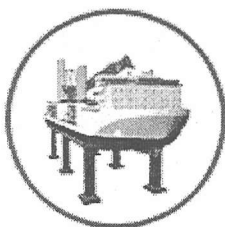
欧州では洋上における風力発電の比重が大きくなってきており、英国では 2010 年までに国内電力の 2%、デンマークでは 2030 年までに 4,000MW の洋上発電を計画している。これらは、英国の場合 2MW クラスのタービン 1,300 基、デンマークの場合 2,000 基の建設が必要となる。従って、このような建設需要に対応できる施工方法の開発が既に始まっており、英国の Mayflower Energy 社は、洋上風力施設専用の作業船の建造に着手した。図-7 に同社の洋上風力施設専用作業船の概念図を示す<sup>9)</sup>。大型 SEP にタワークレーンを載せて大口径ドリルビットにより中掘工法を施工し、タワー、ナセル、ブレードの組立を 1 船団で行っている状況や、新しい洋上風力施設専用作業船が建造されている情報は、未だ洋上施設がなく大規模な計画も存在しない日本では考えられない状況である。欧州では今後、大型洋上風力発電施設向けタービン、基礎、施工法、施工船、維持管理システム、運用システムなどの技術開発が大きく進められるものと考えられる。

## 7. おわりに

風車システムを搭載する浮遊式構造物については、海洋石油生産などにおいて実績のある様々な構造様式があり、設置海域の特性によって適切な様式が選定される。本研究においては、水深約 200m の海域を対象とする構造様式については S/S 型と Spar 型、水深約 50 m の場合には箱型、さらに水深約 20m の浅海域を対象とする場合には曳航・着座型を選定して概念設計が行われた。しかし、構造形式と許容浮体傾斜角度、風車特性に適合する最適浮体構造、長期耐久性、風車支持構造と浮体構造の接合構造など、未だ検討すべき多くの課題が残されている。



自航時



ジャッキアップ時

図-7 英国 Mayflower Energy 社が建造中の洋上風力施設専用作業船

## 参考文献

- 1) 平成 13 年度海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究報告書 - 風力発電を核とする大規模浮遊式洋上エネルギー供給システムの実現性に関する調査研究一, (社) 日本機械工業連合会, (社) 日本海洋開発産業協会, 平成 14 年 3 月
- 2) 平成 14 年度浮遊式洋上風力発電基地の自然エネルギー(電力等)の最適な輸送技術に関する調査研究報告書, (社) 日本機械工業連合会, (社) 日本海洋開発産業協会, 平成 15 年 3 月
- 3) Ushiyama, I., Seki, K., and Miura, H. : A Feasibility Study on Floating Offshore Wind Farms in Japanese Waters, EUROPEAN SEMINAR-Offshore Wind Energy in Mediterranean and Other European Seas, Naples - Campania (Italy), 10-12 April, 2003.
- 4) 金網正夫, 中澤直樹 : 浮遊式洋上風力発電, 作業船 No.264, pp54-59, (社) 日本作業船協, 2002 年 11 月
- 5) 金網正夫 : 浮遊式風力発電について - 海洋資源エネルギー総合利用システムの実現を目指して -, 第 2 回風力エネルギー利用総合セミナー, 2002 年 6 月 21-22 日
- 6) Opti-OWECS (Structural and Economic Optimization of Bottom-Mounted Offshore Wind Energy Converters) Final Report, 1998
- 7) Danish Wind Industry Association ホームページ <http://www.windpower.org/tour/index.htm>
- 8) Henderson, A. R., et. al. : 'Potential for Floating Offshore Wind Energy in Japanese Waters'. ISOPE-2002, May 26-31, Kitakyushu Japan.
- 9) Mayflower Energy 社ホームページ <http://www.mayflower-energy.com/index2.htm>